

УДК 535.2

## МЕТОД ЦИКЛИЧЕСКОГО МНОГОИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИГНАЛОВ ФОТОННОГО ЭХА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

*В.Т. Сидорова, И.И. Попов, М.Ю. Кокурин, А.И. Орлов*

### Аннотация

Работа посвящена теоретическим исследованиям свойств сигналов фотонного эха (ФЭ), циклически возбуждаемых в многоимпульсном режиме, и возможным их применениям при создании оптического сопроцессора. В основу исследований положены методы математического моделирования режимов многоимпульсного циклического возбуждения и регистрации сигналов ФЭ. Разработана методика оптимизации значений «площади» импульсов возбуждающей последовательности для получения максимального количества регистрируемых сигналов ФЭ, циклически возбуждаемых в многоимпульсном режиме. Выявлены комбинаторные и поляризационные свойства регистрируемых сигналов ФЭ и разработаны новые методы оптической обработки информации на их основе. Установлена зависимость параметров взаимосвязанных комбинаторными свойствами числовых последовательностей от условий возбуждения сигналов ФЭ.

**Ключевые слова:** фотонное эхо, резонансная среда, вектор поляризации ФЭ, условия пространственного и временного синхронизма, многоимпульсное возбуждение сигналов ФЭ, комбинаторные свойства сигналов ФЭ, оптическая обработка информации, оптический сопроцессор.

---

### Введение

В данной теоретической работе рассматривается режим возбуждения сигналов ФЭ последовательностью равных по длительности и интенсивности лазерных импульсов, когда первый импульс поступает под острым углом к направлению распространения остальных импульсов. При этом формируются различные сигналы ФЭ в трех выбранных направлениях их регистрации: сигналы первичного ФЭ (ПФЭ), сигналы стимулированного ФЭ (СФЭ) и восстановленного ФЭ (ВФЭ). Свойства совокупности этих сигналов, получаемых в циклическом многоимпульсном режиме возбуждения сигналов ФЭ, ранее не исследовались. Предложенный метод математического моделирования режимов многоимпульсного циклического возбуждения сигналов ФЭ, основанный на условиях пространственного и временного синхронизмов [1, с. 141], справедливых для графического метода расчета, позволяет получить оригинальную информацию о свойствах этих эхо-сигналов.

Выражения для зависимости интенсивности сигналов ФЭ от «площади» импульсов возбуждающей последовательности приведены в [2, с. 58]. Методика оптимизации «площади» импульсов возбуждающей последовательности для всех эхо-сигналов, при которой обеспечивается наибольшее количество регистрируемых приемной аппаратурой сигналов ФЭ, отсутствует. Увеличение количества регистрируемых эхо-сигналов за счет применения двух поляризационных каналов с ортогональными направлениями ориентации векторов поляризации оптических импульсов расширяет возможности практического применения свойств этой совокупности эхо-сигналов. Многоимпульсный режим циклического возбуждения

эхо-сигналов может позволить установить новые численные зависимости между последовательностями параметров возбуждения и регистрации эхо-сигналов, имеющими место в этом режиме. В свою очередь, зависимость цифровых значений, содержащихся в этих последовательностях, от параметров резонансной среды и возможные методы оптической обработки информации, представленной цифровыми последовательностями, в научной литературе не описывались. Получению этих актуальных с позиции оптической обработки информации физических результатов по свойствам ФЭ, циклически возбуждаемого в многоимпульсном режиме, посвящена данная работа.

### 1. Комбинаторные свойства сигналов ФЭ при их циклическом возбуждении в многоимпульсном режиме

Выявленные в данных исследованиях комбинаторные свойства сигналов ФЭ заключаются в наличии системной взаимосвязи последовательности временных интервалов между возбуждающими импульсами с последовательностью соответствующих направлений циклической регистрации эхо-сигналов. Эти свойства основаны на пространственно-временных закономерностях формирования эхо-сигналов, использующих условия пространственного и временного синхронизма для ФЭ [1]. Для исследования комбинаторных свойств ФЭ, был использован графический метод расчета эхо-сигналов. В этом методе результат воздействия всей серии импульсов из  $n$  на среду описывается следующим образом [1, с. 141]. В момент времени

$$t = t_n - \sum_{m=1}^{n-1} \tau_m \gamma_m \quad (1)$$

при условии  $t > t_n$  наблюдается отклик среды в направлении

$$\vec{k}_0 = \sum_{m=1}^n (\gamma_m - \gamma_{m-1}) \vec{k}_m, \quad (2)$$

где  $t_n$  – время генерации последнего возбуждающего импульса; значения  $\gamma_0 = 0$ ,  $\gamma_n = 1$ ,  $\gamma_m \in \{-1, 0, 1\}$ ,  $m = 1, \dots, n-1$ , соответствуют элементам матрицы плотности двухуровневой среды. Для выявления комбинаторных свойств ФЭ необходимо сформировать последовательность из  $n$  равных по длительности и амплитуде лазерных импульсов, отделяемых произвольными временными интервалами  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}$ . Методика включала последующее циклическое возбуждение и регистрацию  $(n-2)$  раза эхо-сигналов с уменьшением возбуждающих лазерных импульсов на один первый импульс в каждом последующем цикле возбуждения. В каждом цикле возбуждения направления распространения всех возбуждающих импульсов кроме первого должны совпадать и равняться  $\vec{k}_2$ . Волновой вектор первого возбуждающего импульса  $\vec{k}_1$  должен составлять острый угол по отношению к вектору  $\vec{k}_2$ . Суммарное время возбуждения и регистрации сигналов ФЭ не должно превышать время необратимой поперечной релаксации  $T_2$  резонансной среды. При этом необходимо регистрировать сигналы ФЭ, формирующиеся после последнего возбуждающего импульса. Такое задание параметров возбуждающих импульсов обеспечивало зависимость направления регистрации эхо-сигналов в каждом цикле только от  $\gamma_1$  в (2):

$$\vec{k}_0 = \gamma_1 \vec{k}_1 + (1 - \gamma_1) \vec{k}_2. \quad (3)$$

Из (3) следует, что отклики среды будут наблюдаться только в трех направлениях  $\vec{k}_0 = \vec{k}_1$  при  $\gamma_1 = 1$ ;  $\vec{k}_0 = \vec{k}_2$  при  $\gamma_1 = 0$ ;  $\vec{k}_0 = 2\vec{k}_2 - \vec{k}_1$  при  $\gamma_1 = -1$ .

Следовательно, для определения всего набора неизвестных  $\gamma_1 \in \{-1, 0, 1\}$ ,  $m = 1, \dots, n-1$ , необходимо таким образом циклически возбуждать сигналы ФЭ через время, превышающее время релаксации  $T_1$ . Регистрируя в заданное время один из эхо-сигналов в каком-либо из трех возможных направлений волнового вектора, мы последовательно определяем одно из возможных значений набора  $\gamma_1 \in \{-1, 0, 1\}$  в соответствующем акте возбуждения последовательности эхо-сигналов. При этом время регистрации эхо-сигналов в каждом последующем цикле определяется в соответствии с (1) и с учетом найденной в данном акте  $\gamma_1$ . Акты возбуждения эхо-сигналов повторяются до определения  $\gamma_{n-2}$ . Последняя неизвестная  $\gamma_{n-1}$  вычислялась с помощью выражения (1). Таким образом, определялся один набор произведений  $\tau_m \gamma_m$ ,  $m = 1, \dots, n-1$  из нескольких возможных.

Это означает, что комбинации временных интервалов, отделяющих импульсы в возбуждающей последовательности, соответствует вполне определенная комбинация элементов последовательности значений  $\gamma_m$ , в чем и проявляются комбинаторные свойства сигналов ФЭ при их циклическом возбуждении в многоимпульсном режиме.

## 2. Методика оптимизации значений «площади» импульсов последовательности, возбуждающей максимальное количество регистрируемых эхо-сигналов

Принципиальным требованием, обуславливающим эффективное использование рассмотренных комбинаторных свойств, является возможность регистрации всех эхо-откликов, возникающих после окончания действия последнего возбуждающего импульса [1, с. 146–147; 2, с. 58]. Характер распределения энергии по эхо-откликам зависит в значительной степени от «площадей» возбуждающих импульсов. Определим оптимальную «площадь» возбуждающих импульсов для максимизации интенсивности наиболее слабых откликов и оценим допустимое число возбуждающих импульсов, при которых возможна регистрация всей совокупности эхо-откликов, что было сделано в [3].

Поставим задачу отыскания такой площади импульса  $\theta \in [0, \pi]$ , при которой наименьшая из «локальных амплитуд», зависящих от направления регистрации и «площади» возбуждающих импульсов [2, с. 58], имела бы максимальное значение. Как показывает анализ полученной функции, ее максимум равен  $1/3$  и достигается при двух значениях площади импульсов:  $\theta_1^* = \arccos(1/3) \approx 70.5^\circ$  и  $\theta_2^* = \pi - \theta_1^* \approx 109.5^\circ$  [3]. В качестве числового критерия, характеризующего принципиальную возможность фиксации отдельного эхо-отклика, рассмотрим отношение интенсивности эхо-сигнала к интенсивности некогерентного спонтанного шума аналогично работе [2, с. 88]. Тогда для определения  $n$  имеем условие  $\frac{10^6 \delta_0}{9^n} \geq 10^2$ , которое определяет следующий диапазон изменения количества импульсов  $n$ :  $3 \leq n \leq 10$ , где  $\delta_0 = 10^8$  [3].

## 3. Поляризационные свойства эхо-сигналов при циклическом многоимпульсном их возбуждении

Для обоснования возможности применения поляризационных свойств всей совокупности эхо-сигналов после воздействия  $n$  возбуждающих коротких импульсов проведем выкладки, аналогичные [1, с. 146]. Принимаем, что матрица плотности системы  $\rho(t)$  в момент времени  $t$  имеет вид [2, с. 64]:

$$\tilde{\rho}(t) = L(t)\rho_0 L(t)^{-1}, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  – равновесная матрица плотности. Оператор эволюции  $L(t)$  в случае многоимпульсного воздействия аналогично [2, с. 183] будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
L(t) = & \exp \left( - \sum_j R_3^j \Delta w_j (t - \tau_1 - \dots - \tau_{n-1}) \right) \times \\
& \times \exp \left( -i\psi_n \sum_j R_3^j \right) \exp \left( -i\theta_n \sum_j R_1^j \right) \times \\
& \times \exp \left( i\psi_n \sum_j R_3^j \right) \times \dots \times \exp \left( - \sum_j R_3^j \Delta w_j \tau_1 \right) \times \\
& \times \exp \left( -i\psi_1 \sum_j R_3^j \right) \exp \left( -i\theta_1 \sum_j R_1^j \right) \exp \left( i\psi_1 \sum_j R_3^j \right), \quad (5)
\end{aligned}$$

где  $\psi_n$  – угол между вектором поляризации  $n$ -го импульса и выделенной осью ( $X$ -осью) в плоскости, перпендикулярной оптической оси твердого тела. Воспользуемся методикой расчета работы [1, с. 146] и получим следующий недиагональный элемент матрицы плотности в картине Шредингера:

$$\rho_{\gamma n}(t') = \exp[-\gamma_n (wt - \psi_0)] \tilde{\rho}_{\gamma n}(t_n). \quad (6)$$

Интегрирование по координатам частиц дает условие для углов вектора поляризации оптических эхо-сигналов:

$$\gamma_n \psi_0 = \sum_{m=1}^n (\gamma_m - \gamma_{m-1}) \psi_m. \quad (7)$$

Как следует из (7), для ПФЭ  $\psi_0 = \gamma_1 \psi_1 + (1 - \gamma_1) \psi_2$ . Для ВФЭ и СФЭ угол вектора поляризации равен  $\psi_0 = \gamma_1 \psi_1 + (\gamma_2 - \gamma_1) \psi_2 + (1 - \gamma_2) \psi_3$ . Анализ полученных выражений для углов вектора поляризации ПФЭ, ВФЭ и СФЭ указывает на возможность использования поляризационных свойств для увеличения размерностей связанных комбинаторными свойствами последовательностей.

Используем полученные результаты для задачи установления комбинаторных свойств (1). Обозначим  $\tau_0 = b$ ,  $t = t_n - b$  и перепишем уравнение (1) следующим образом [3, 4]:

$$\sum_{m=0}^{n-1} \tau_m x_m = 0; \quad x_0 = -1, \quad x_m \in \{-1, 0, 1\}, \quad m = 1, 2, \dots, n-1. \quad (8)$$

Положим  $s = [n/2]$ ,  $y_i = -x_i$ ,  $i = s+1, \dots, n-1$  ( $[a]$  – целая часть числа  $a$ ) и перепишем (8) в эквивалентном виде

$$\begin{aligned}
\sum_{m=0}^s \tau_m x_m &= \sum_{m=s+1}^{n-1} \tau_m y_m; \quad x_0 = -1, \\
x_m &\in \{-1, 0, 1\}, \quad m = 1, 2, \dots, s, \\
y_m &\in \{-1, 0, 1\}, \quad m = s+1, \dots, n-1.
\end{aligned} \quad (9)$$

На первом этапе решения задачи необходимо определить, наблюдаются ли отклики в одном направлении от двух поляризационных каналов одновременно,

иначе задача (8) решений не имеет. Если задача имеет решение, ее можно свести к двум отдельным задачам вдвое меньшей размерности:  $\sum_{m=1}^s \tau_m x_m = t^* - T + b$  и  $\sum_{m=s+1}^{n-1} \tau_m y_m = t^* - T$ . Здесь  $t^*$  – время излучения последних возбуждающих импульсов,  $T$  – момент одновременного наблюдения эхо-откликов в двух поляризационных каналах на первом этапе решения задачи. Направления векторов линейной поляризации сигналов в параллельных каналах выбираются взаимно перпендикулярными для достижения надежного распознавания этих сигналов. Тогда каждая из этих задач может быть независимо решена в своем поляризационном канале, при этом  $\psi$  может принимать только два значения:  $\psi_1$  в  $A$ -канале и  $\psi_2$  в  $B$ -канале. При  $\gamma_1 = 0$  и  $\gamma_1 = -1$  сигналы ПФЭ могут иметь значения  $\psi_0 = \psi_1$  или  $\psi_0 = \psi_2$ , если оба возбуждающих импульса имеют одинаковый угол вектора поляризации, равный  $\psi_1$  или  $\psi_2$  соответственно. Аналогично, для сигналов ВФЭ, которые могут наблюдаться только в направлениях  $\gamma_1 = 1$  и  $\gamma_1 = 0$ . Если хотя бы один из возбуждающих импульсов имеет отличный от остальных угол вектора поляризации, то сигналы ПФЭ и ВФЭ не будут наблюдаться.

Сигналы СФЭ могут быть «истинными», если все три возбуждающих импульса имеют одинаковые значения угла вектора поляризации, и «ложными», если хотя бы один из возбуждающих импульсов имеет отличный от других угол вектора поляризации. Как «истинные», так и «ложные» сигналы СФЭ должны иметь значения угла поляризации  $\psi_0 = \psi_1$  или  $\psi_0 = \psi_2$  в зависимости от очередности углов векторов поляризации возбуждающих импульсов. Поэтому для разделения «ложных» и «истинных» эхо-сигналов возбуждающие импульсы различных поляризационных каналов должны иметь отличающуюся амплитудно-временную форму. Для распознавания форм «ложных» и «истинных» после детекторов эхо-сигналов устанавливаются многоуровневые компараторы электрических сигналов. В  $A$ -канале используется кодовая последовательность импульсов с гладкой амплитудно-временной формой, имеющей вид колокола, а в  $B$ -канале – с амплитудно-временной формой, имеющей модуляцию в виде провала формы колокола в его центре (двугорбовой). Эхо-отклики, имеющие линейную поляризацию в двух различных направлениях, различаются призмой Глана (рис. 1). В обоих каналах по всем направлениям распространения эхо-сигналы пропускаются затворами, установленными перед компараторами, лишь в определенные моменты времени. При анализе учитывается, что «истинные» сигналы  $A$ -канала всегда имеют вертикальное направление вектора поляризации с гладкой амплитудно-временной формой, а в  $B$ -канале – горизонтальное с многогорбовой амплитудно-временной формой. «Ложные» сигналы в  $A$ -канале имеют многогорбовую амплитудно-временную форму, в  $B$ -канале – двугорбовую амплитудно-временную форму. «Ложные» сигналы не учитываются при обработке информации. В случае регистрации отклика детектором Д1 в  $A$ -канале обработки информации и детектором Д2 в  $B$ -канале имеем, что  $x_m = 1$ , детектором Д3 в  $A$ -канале и детектором Д4 в  $B$ -канале:  $x_m = 0$ , детектором Д5 в  $A$ -канале и детектором Д6 в  $B$ -канале:  $x_m = -1$  (рис. 1).

На рис. 2 представлена принципиальная схема формирования выходных кодов в двух параллельных каналах обработки информации.

#### 4. Зависимость комбинаторных свойств сигналов ФЭ от параметров среды

Получим выражение для интенсивности оптических когерентных откликов после резонансного воздействия на систему последовательности из  $n$  импульсов для



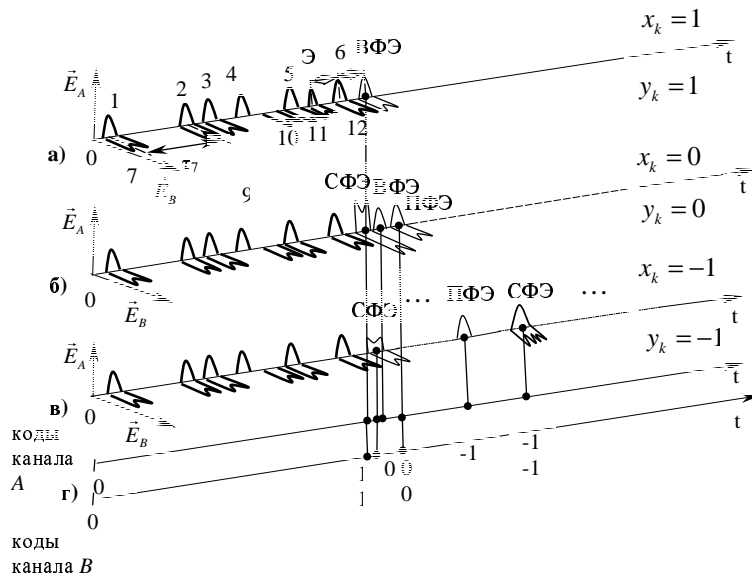


Рис. 2. Принципиальная схема формирования выходных кодов в двух параллельных каналах обработки информации, где  $\vec{E}_A$  и  $\vec{E}_B$  – амплитуды напряженностей поля

мента и параметрах резонансной среды можно вычислить допустимые значения  $n$  и  $\tau_m$ , связанные комбинаторными свойствами сигналов ФЭ при их циклическом возбуждении в многоимпульсном режиме.

### 5. Методы оптической обработки информации на основе комбинаторных свойств ФЭ

Оптическая обработка информации на основе ФЭ позволяет реализовать ряд режимов микропрограммных вычислений. Известны методы микропрограммных вычислений, производимых над гиперкомплексными величинами (кватернионами) [6]. В этой работе сообщается о применении установленных комбинаторных свойств фотонного эха при решении троичной «задачи о рюкзаке». Формулировка задачи заключается в следующем. По данным значениям  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}$ ,  $c > 0$  требуется выяснить, имеет ли решение уравнение

$$\sum_{m=1}^{n-1} \tau_m x_m = c, \quad x_m \in \{0, 1, 2\}, \quad m = 1, 2, \dots, n-1, \quad (10)$$

и найти это решение в случае разрешимости (7) [7]. Искомые значения  $x_m$ ,  $m = 1, 2, \dots, n-1$  могут быть последовательно определены при помощи оптического сопроцессора [8, 9], работающего в составе обычного персонального компьютера. Предлагаемая структурная схема оптического сопроцессора приведена на рис. 1 [8, 9].

### Заключение

Выявлены комбинаторные свойства сигналов ФЭ, основанные на пространственном и временном синхронизме для ФЭ при циклическом многоимпульсном режиме возбуждения эхо-сигналов. Разработана методика многокритериальной оптимизации «площади» импульсов возбуждающей последовательности и получены

оптимальные ее значения для установления комбинаторных свойств сигналов ФЭ. Предложена методика многоимпульсного режима возбуждения сигналов ФЭ в двух поляризационных каналах с линейной поляризацией в ортогонально ориентированных направлениях. Получены общие выражения для угла между вектором поляризации эхо-сигнала и выделенной осью ( $X$ -осью) в многоимпульсном режиме его возбуждения. Получена зависимость интенсивностей эхо-откликов от параметров резонансной среды и условий возбуждения эхо-сигналов, при которых проявляются комбинаторные свойства сигналов ФЭ. Разработан метод оптической обработки информации на основе комбинаторных свойств циклического многоимпульсного режима возбуждения сигналов ФЭ.

### Summary

*V.T. Sidorova, I.I. Popov, M.Yu. Kokurin, A.I. Orlov.* A method of Cyclic Multipulse Excitation of Photon Echo Signals and Its Application.

The paper presents theoretical study of the properties of photon echo (PE) signals cyclically excited in a multipulse mode, and discussion of possible applications to constructing an optical coprocessor. The research is based on mathematical modeling methods for modes of multipulse cyclic excitation and registration of PE signals. A method for optimization of "area" values of pulses in exciting sequences is developed. This allows maximizing the number of registered PE signals excited in a multipulse mode. On the basis of revealed combinatorial and polarizing properties of registered PE signals, new methods for optical data processing are developed.

**Key words:** photon echo, resonant medium, polarization vector of PE, spatial and time synchronism conditions, multipulse excitation of PE signals, combinatorial properties of PE signals, optical data processing, optical coprocessor.

### Литература

1. Калачев А.А., Самарцев В.В. Когерентные явления в оптике. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2003. – 281 с.
2. Маныкин Э.А., Самарцев В.В. Оптическая эхо-спектроскопия. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
3. Nigmatullina V.T., Kokurin M.Yu., Popov I.I. Modeling of the multipulse photon echo and its application in specialized optical computers// Physics of Wave Phenomena. – 2009. – V. 17, No 1. – P. 1–6.
4. Popov I.I., Kokurin M.Yu., Nigmatullina V.T. Multipulse photon echo and principles of parallel functioning of optical echo-processors // Proc. SPIE. – 2008. – V. 7024. – P. 70240K.
5. Нигматуллина В.Т., Попов И.И., Кокурин М.Ю. Поляризационные свойства многоимпульсного фотонного эха и их применение при разработке оптического процессора для решения специальных математических задач // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: Сб. тр. – Казань, 2007. – С. 207–211.
6. Попов И.И., Нигматуллина В.Т. Физическое моделирование физических операций над гиперкомплексными числами и его роль в построении квантовой памяти на фотонном эхе // Изв. РАН. Сер. физ. – 2008. – Т. 72, № 5. – С. 767–770.
7. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. – М.: Мир, 1982. – 416 с.
8. Попов И.И., Кокурин М.Ю., Нигматуллина В.Т. Многоимпульсное возбуждение фотонного эха и его применение для разработки принципа построения оптического эхо-процессора // Изв. РАН. Сер. физ. – 2008. – Т. 72, № 1. – С. 58–60.



9. *Низматуллина В.Т., Попов И.И., Кокурин М.Ю.* Многоимпульсное фотонное эхо и микропрограммные оптические вычисления // Научная сессия МИФИ-2009: Аннотации докл. – М.: МИФИ, 2009. – Т. 2. – С. 184.

Поступила в редакцию  
16.01.09

---

**Сидорова Вера Тагировна** – аспирант кафедры электромеханики Марийского государственного университета, г. Йошкар-Ола.

**Попов Иван Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики Марийского государственного университета, г. Йошкар-Ола.

E-mail: *popov@marsu.ru*

**Кокурин Михаил Юрьевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математического анализа и теории функций Марийского государственного университета, г. Йошкар-Ола.

E-mail: *kokurin@marsu.ru*

**Орлов Александр Игоревич** – аспирант кафедры электромеханики Марийского государственного университета, г. Йошкар-Ола.